

УДК 621.455.4

## ПРЯМОТОЧНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С АЗИМУТАЛЬНЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Рязанов В. А., Шилов С. О.

Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Одним из основных способов увеличения полезной нагрузки при выводе космического аппарата на орбиту является снижение массы вспомогательных систем или в целом отказ от некоторых из них. Использование в качестве рабочего вещества для двигательной установки (ДУ) забортного воздуха позволит отказаться от традиционных систем хранения и подачи рабочего тела и увеличит срок активного существования спутника на низкой околоземной орбите. В качестве двигателя для ДУ рассматриваются различные типы электростатических двигателей, в том числе холловские двигатели [1]. Забортный воздух является не типичным рабочим веществом для холловского двигателя (традиционно используется инертный газ ксенон), поэтому процессы в канале таких двигателей изучены мало. Кроме того, параметры двигателя, работающего на забортном воздухе, будут отличаться от характеристик существующих серийных моделей и для проектирования двигательных установок с таким двигателем необходимо для всего диапазона возможных высот определить базовые проектные характеристики.

В работе предложена принципиальная схема двигательной установки на забортном воздухе (рисунок 1).

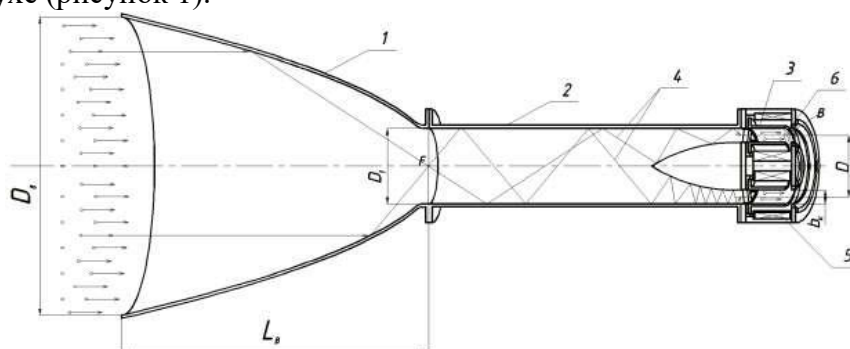


Рис. 1. Принципиальная схема двигательной установки на забортном воздухе: 1 – конфузор, 2 – воздушный канал; 3 – анод; 4 – траектории движения частиц; 5 – магнитная система, 6 – ускорительный канал

Для определения возможного диапазона высот вводится ряд ограничений:

1. Недостаточный расход рабочего тела через ускорительный канал.
2. Избыточный расход газа через канал.
3. Возможности бортовой системы электропитания.
4. Габариты космического аппарата.

Основной задачей при оценке параметров двигателя является расчет параметров ионизации и столкновений для воздушной плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Принималось, что в разряде действует механизм диффузии электронов к аноду за счет упругого рассеяния на нейтральных частицах плазмообразующего газа, а ионизация нейтральных частиц происходит электронным ударом из основного состояния.

По данным [2, 3] на высотах 150–250 км азот присутствует в основном в молекулярном виде, а кислород – в атомарном. При этом их концентрации примерно

равны. Наличием прочих компонентов пренебрегалось. Допускалось, что при сжатии и термализации в конфузоре и воздушном канале велика вероятность объединения атомарных частиц кислорода в молекулу  $O_2$ . Поэтому для расчета принималось, что доля кислорода  $a_{O_2}$  в поступающей в двигатель смеси равна  $1/3$ , а азота –  $a_{N_2}=2/3$ .

В работах [4,5] приведены значения сечений элементарных процессов при налете электрона на нейтральные частицы азота и кислорода. Их анализ показал, что основным процессом в широком диапазоне энергий частиц является упругое рассеяние электрона на молекулах азота и кислорода соответственно. Объемные скорости столкновений электронов  $\Sigma_{ea}$  и ионизации  $\Sigma_i$  рассчитаны согласно [6,7].

Для значения вероятности ионизации частицы ( $P=0,5$ ) при пролете через анодный слой была определена минимальная плотность тока нейтральных частиц  $j_{amin}$ :

$$j_{amin} = 1,6 \cdot 10^{-7} \frac{B}{A} \sqrt{\frac{T_a}{\Sigma_{ea} \Sigma_i}}, \quad (1)$$

где  $T_a$  - температура газа К,  $A=29$  а.е.м. – средняя атомная масса воздуха,  $B$  – величина индукции магнитного поля, Тл.

Максимальная плотность потока  $j_{amax}$ , соответствующая ограничению 2:

$$j_{amax} = 4 \cdot 10^{-6} \frac{B}{\beta_{min} \Sigma_{ea}} \sqrt{\frac{T_a}{A}}, \quad (2)$$

где  $\beta_{min}$  - минимально необходимое значение параметра Холла для электронов.

В работе определены допустимые диапазоны геометрических размеров предложенной двигательной установки. Показано, что использование холловского двигателя с анодным слоем на забортом воздухе возможно на высотах от 170 до 300 км. При этом требуемая потребляемая мощность двигательной установки будет составлять от 400 до 2000 Вт при площадях поперечного сечения КА от 1 до 3 м<sup>2</sup>. Минимальные ускоряющие напряжения для поддержания КА на заданной орбите составляют от 150 до 250 В. Характерные значения диаметра канала двигателя лежат в диапазоне от 60 до 120 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-38-00776\16 от 25.02.2016 г.

#### Библиографический список

- Духопельников, Д. В., Ивахненко, С. Г., Курилович, Д. А. Холловские двигатели на забортом воздухе для космических аппаратов на низкой опорной орбите // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 12. С. 227-238.
- Space Environment Technologies. Режим доступа: <http://www.spacewx.com> (дата обращения 30.04.2017).
- ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. Введ. 1982-06-30. М.: Изд-во стандартов, 2004. 2315 с.
- Yu. Itikawa. Cross Sections for Electron Collisions with Nitrogen Molecules. Journal of Physical and Chemical Reference Data. Vol. 35, No. 1, 2006.
- Yu. Itikawa. Cross Sections for Electron Collisions with Oxygen Molecules. Journal of Physical and Chemical Reference Data. Vol. 38, No. 1, 2009.
- Духопельников, Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко, С.Г., Управление ионными потоками в холловских ускорителях // Вестник Московского Авиационного Института. 2017. №2. С. 24-30.
- Духопельников Д. В., Ивахненко С. Г., Рязанов В. А., Шилов С. О., О возможности использования холловского двигателя на забортом воздухе для удержания космического аппарата на низкой околоземной орбите // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. №12. С. 57-71.